الكتاب الأول	التطورات الرتـيبة
الوحدة 01	تطور كميات مادة المتفاعلات والنواتج خلال تحول كيميـائي في محلول مائي
حلـول تمـارين الكتاب المدرسي	GUEZOURI Aek – Lycée Maraval - Oran

الجزء الثالث (حسب الطبعة الجديدة للكتاب المدرسي المعتمدة من طرف المعهد الوطني للبحث في التربية)

التمرين 17

1 – جدول التقدّم :

معادلة التفاعل	$C_{12}H_{22}O_{11\,(aq)}$	+	$H_2O_{(l)}$	=	$C_6H_{12}O_{6\,(aq)}$ + $C_6H_{12}O_{6\,(aq)}$

حالة الجملة	التقدم	كمية المـــادة (mol)			
الحالة الابتدائية	0	n_0	بزيادة	0	0
الحالة الانتقالية	x	$n_0 - x$	بزيادة	x	x
الحالة النهائية	x_{max}	$n_0 - x_{max}$	بزيادة	x_{max}	x_{max}

2 - سرعة التفاعل مفهوم يتجانس مع كميّة مادة مقسومة على زمن . تتناسب سرعة التفاعل في كل لحظة مع مشتق التقدّم بالنسبة للزمن ، وهو ميل المماس في اللحظة t .

المطلوب هنا أن نبيّن أن السرعة الحجمية للتفاعل هي $\frac{dy}{dt}$.

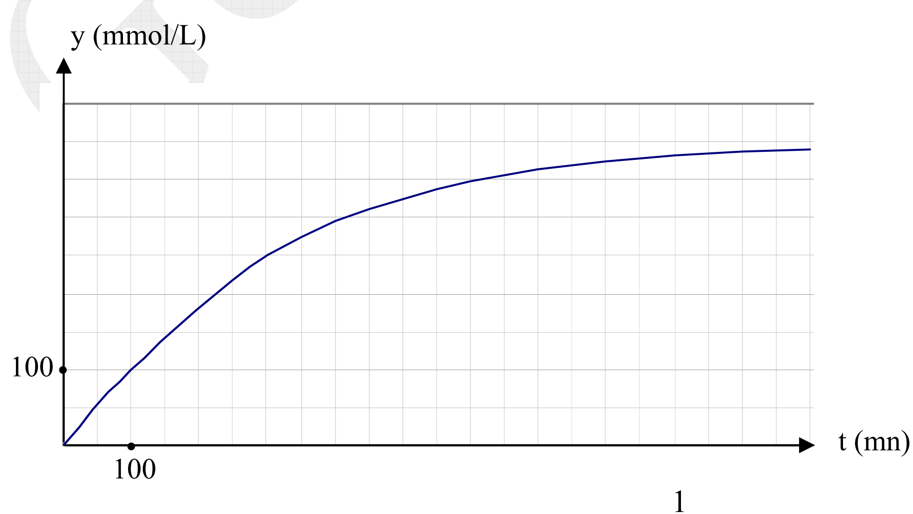
لدينا $[S_i]=\frac{n_0}{V}$ و $[S]=\frac{n_0-x}{V}$ ، ولدينا كذلك $y = [S_i] - [S]$ ، و منه :

$$\frac{dy}{dt}=\frac{d([S_i]-[S])}{dt}=\frac{d[S_i]}{dt}-\frac{d[S]}{dt}=\frac{1}{V}\frac{dn_0}{dt}-\frac{1}{V}\frac{dn_0}{dt}+\frac{1}{V}\frac{dx}{dt}=\frac{1}{V}\frac{dx}{dt}$$

الكمية $y=[S_i]-[S]$ هي التركيز المولي للساكاروز في اللحظة t ، حيث : $y=\frac{n_0}{V}-\frac{n_0-x}{V}=\frac{x}{V}$.

3 – الجدول :

t (mn)	0	100	300	500	700	900	1100
y (mmol/L)	0	100	250	325	363	381	390



4 -

لدينا $y=\frac{x}{V}$ ، أي $x(t)=V\,y(t)$

ازدياد $y(t)$ يؤدّي إلى ازدياد $x(t)$

نلاحظ أنه كلما يزداد تقدم التفاعل تتناقص السرعة الحجمية للتفاعل .

التمرين 18

معادلة التفاعل : $5Br^- + BrO_3^- + 6H^+ = 3Br_2 + 3H_2O$

للمزيد : الثنائيتان هما : BrO_3^- / Br_2 و Br_2 / Br^-

المعادلتان النصفيتان: $2BrO_3^-{}_{(aq)} + 12H^+{}_{(aq)} + 10e^- = Br_{2\,(aq)} + 6H_2O_{(l)}$

$2Br^-{}_{(aq)} = Br_{2\,(aq)} + 2e^-$

1 **- جدول التقدّم**

معادلة التفاعل	$5Br^-{}_{(aq)} +$		$BrO_3^-{}_{(aq)} + 6H^+$	$=$	$3Br_{2\,(aq)} +$	$3H_2O_{(l)}$
حالة الجملة	التقدم	كمية المـــادة (mol)				
الحالة الابتدائية	0	$n_0(Br^-)$	$n_0(BrO_3^-)$	$n_0(H^+)$	0	زيادة
الحالة الانتقالية	x	$n_0(Br^-) - 5x$	$n_0(BrO_3^-) - x$	$n_0(H^+) - 6x$	$3x$	زيادة
الحالة النهائية	x_{max}	$n_0(Br^-) - 5x_{max}$	$n_0(BrO_3^-) - x_{max}$	$n_0(H^+) - 6x_{max}$	$3x_{max}$	زيادة

حصيلة المادة معناه التركيب المولي للمزيج (كمية المادة لكل متفاعل ولكل ناتج)

عند اللحظة $t = 0$

الفرد الكيميائي	Br^-	BrO_3^-	H^+	Br_2	H_2O
كمية المادة (mol)	12	2	12	0	زيادة

عند اللحظة $t = t_{1/2}$ (زمن نصف التفاعل)

نبحث أولا عن المتفاعل المحدّ ، بحيث نعدم عدد مولات كل متفاعل ونأخذ أصغر قيمة لـ x .

$n_0(Br^-) - 5x = 0 \Rightarrow x = 2{,}4\ mol$

$n_0(BrO_3^-) - x = 0 \Rightarrow x = 2\ mol$

$n_0(H^+) - 6x = 0 \Rightarrow x = 2\ mol$

المتفاعلان المحدّان هما : BrO_3^- و H^+ ، ومنه $x_{max} = 2\ mol$

عند زمن نصف التفاعل تكون لدينا نصف قيمة x_{max} ، أي : $\frac{x_{max}}{2} = 1\ mol$ ، وبالتالي يكون التركيب المولي للمزيج :

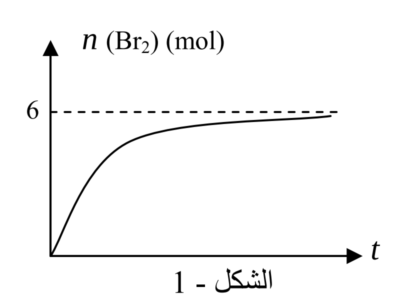
الفرد الكيميائي	Br^-	BrO_3^-	H^+	Br_2	H_2O
كمية المادة (mol)	$12 - 5 = 7$	$2 - 1 = 1$	$12 - 6 = 6$	$3 \times 1 = 3$	زيادة

$t \rightarrow \infty$

عند نهاية التفاعل يكون $x = x_{max}$ ، ويكون حينئذ التركيب المولي للمزيج :

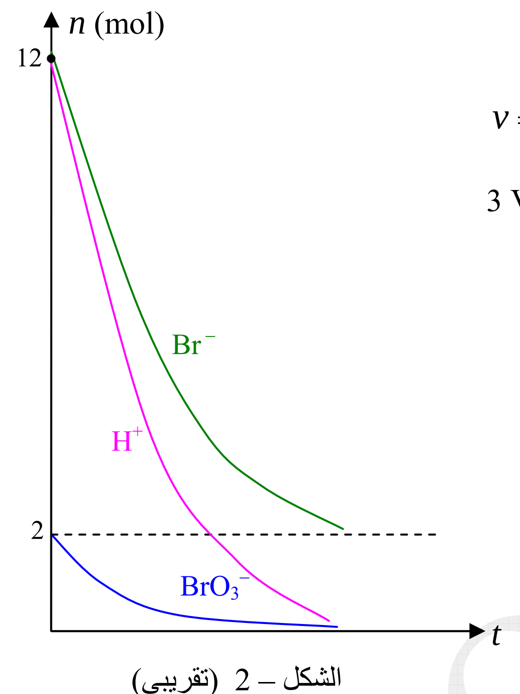
الفرد الكيميائي	Br^-	BrO_3^-	H^+	Br_2	H_2O
كمية المادة (mol)	$12 - 10 = 2$	0	0	$3 \times 2 = 6$	زيادة

2 - أ) عند اللحظة t يكون $n(Br_2) = 3x$ ، وعندما ينتهي t نحو ∞ يكون $x = x_{max}$ ، وبالتالي يكون السلم في الشكل - 1 :



الشكل - 1

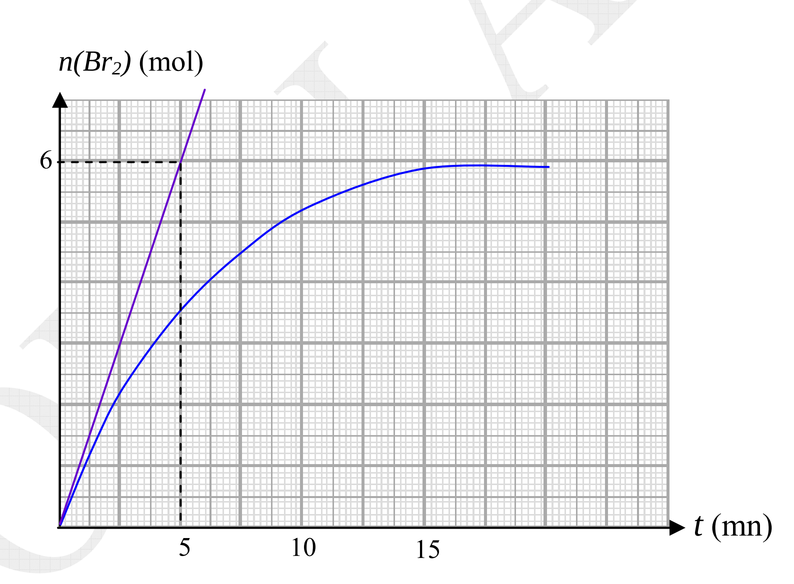
ب) تمثيل $g(t)$ ، $h(t)$ ، $k(t)$ (الشكل – 2)



الشكل – 2 (تقريبي)

جـ) لدينا سرعة التفاعل $v = \frac{1}{V}\frac{dx}{dt} = \frac{1}{V}\frac{d\frac{n(Br_2)}{3}}{dt} = \frac{1}{3V}\frac{d\,n(Br_2)}{dt}$

إذن لحساب سرعة التفاعل ، نحسب ميل البيان $n(Br_2) = f(t)$ ونقسمه على 3 V



ميل المماس عند اللحظة $t = 0$ هو : $\frac{6}{5} = 1{,}2$ ، ومنه السرعة هي : $v = \frac{1{,}2}{0{,}3} = 4\ mol.L^{-1}mn^{-1}$

التمرين 19

1- النواتج هي : شوارد المغنيزيوم (Mg^{2+}) وثنائي الهيدروجين (H_2)

2 –

كمية مــادة حمض كلور الهيدروجين : $n(HCl) = n(H^+) = C\,V' = 0{,}1 \times 0{,}2 = 2{,}0 \times 10^{-2}$ mol

كمية مـادة المغنيزيوم : $n(Mg) = \frac{m}{M} = \frac{9\times10^{-2}}{24{,}3} = 3{,}7\times10^{-3}\ mol$

3 – المتفاعل المحد :

المعادلة	$Mg_{(S)}$ +	$2H^+_{(aq)}$ =	$Mg^{2+}_{(aq)}$ +	$H_{2\,(g)}$
t = 0	$3{,}7\times10^{-3}$	$2{,}0\times10^{-2}$	0	0
t	$3{,}7\times10^{-3} - x$	$2{,}0\times10^{-2} - 2x$	x	x

نعدم عدد مولات كل متفاعل في اللحظة t ونحسب قيمة x في كل معادلة .

$$3,7\times10^{-3}-x \;=0 \quad\Rightarrow\quad x=3,7\times10^{-3}\,mol$$

$$2,0\times10^{-2}-2x \;=0 \quad\Rightarrow\quad x=1,0\times10^{-2}\,mol$$

المتفاعل المحد هو المغنيزيوم لأن $3,7\times10^{-3}<10\times10^{-3}$

4 - العبارة الحرفية للتقدم بدلالة P_{H_2} :

لدينا $P_{H_2}=P-P_{atm}$ ، ولدينا قانون الغازات المثالية $P_{H_2}V=n\,RT$ ، حيث n كمية مادة ثنائي الهيدروجين في اللحظة t والذي يساوي التقدم x . وبالتالي نكتب : $(P-P_{atm})V=x\,RT$ ، مع العلم أن V هو حجم غاز الهيدروجين في اللحظة t .

العبارة هي : $x=(P-P_{atm})V\dfrac{1}{RT}$ (1)

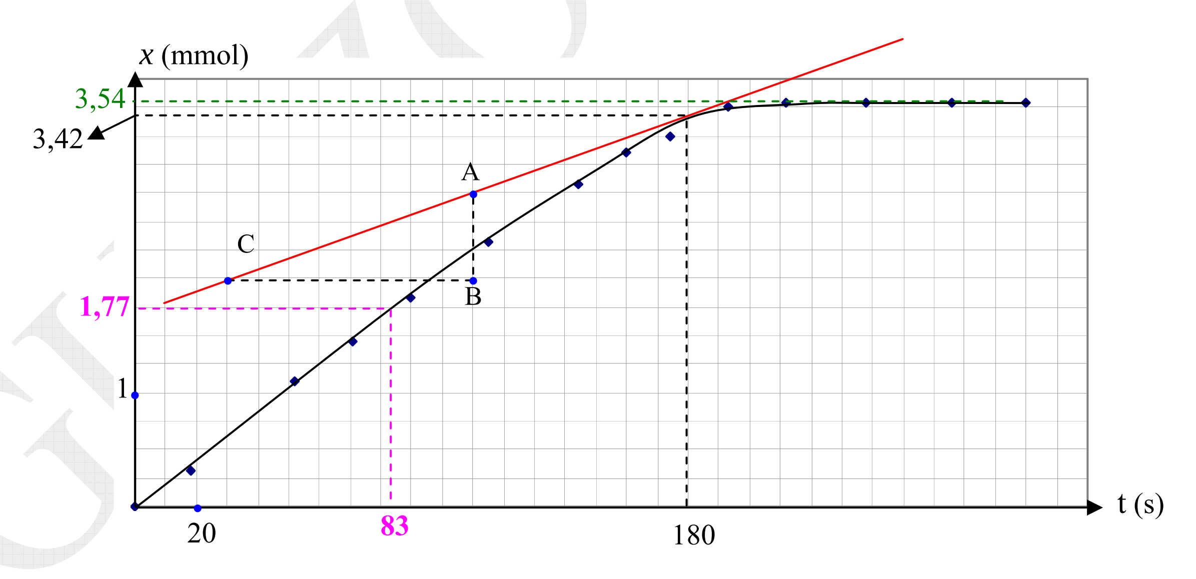
5 – ننشئ جدولا به قيم التقدم والزمن ، بالتعويض في العبارة (1) ، علما أن $V=500-200=300\text{ mL}=3,0\times10^{-4}\text{ m}^3$.

ودرجة الحرارة المطلقة $T=20+273=293°K$ وبالتالي $x=(P-P_{atm})\times1,23\times10^{-7}$

من أجل القيمة الأولى لدينا $P=P_{atm}$ ، وبالتالي $x=0$

من أجل القيمة الثانية لدينا $P-P_{atm}=2,5\times10^3\text{ Pa}$ ، وبالتالي $x=3,1\times10^{-4}\,mol$ ، وهكذا بالنسبة للقيم الباقية .

t (s)	0	18	52	71	90	115	144	160	174	193	212	238	266	290
$x\,(mmol)$	0	0,31	1,10	1,45	1,84	2,32	2 ,83	3,10	3,24	3,50	3,54	3,54	3,54	3,54



6 – من البيان أو من الجدول لدينا $x_{max}\approx3,54$ mmol ، وبالتالي $\dfrac{x_{max}}{2}=1,77\,mmol$ ، وهذه القيمة توافق الزمن $t_{1/2}=83$ s

7 - السرعة الحجمية للتفاعل في اللحظة $t=180$ s :

$$v=\frac{1}{V}\frac{AB}{CB}=\frac{1}{0,2}\frac{0,75\times10^{-3}}{80}=4,7\times10^{-5}\,mol.L^{-1}.s^{-1}$$

8 - من البيان لدينا عند $t=180$ s تكون $x=3,42$ mmol ، ونعلم أن $n\,(H_2)=x$.

نحسب الحجم المولي للغازات في درجة الحرارة 293°K ، أي حجم 1 mol .

$$PV_0 = n\,RT \Rightarrow V_0 = \frac{n\,RT}{P} = \frac{1\times 8.31\times 293}{1,009\times 10^5} = 2413\times 10^{-5}\,m^3 = 24,13L$$

حجم ثنائي الهيدروجين هو V_{H_2} حيث : $n\,(H_2) = \frac{V_{H_2}}{V_0}$ ، وبالتالي : $V_{H_2} = 24,13\times 3,4\times 10^{-3} = 82\times 10^{-3}\,L$

أو بطريقة أخرى : $V_{H_2} = \frac{x\,RT}{P} = \frac{3,42\times 10^{-3}\times 8,31\times 293}{1,009\times 10^5} \approx 82\times 10^{-6}\,m^3 = 82\,mL$

$n\,(Mg^{2+}) = x = 3,42$ mmol ، ويكون التركيز المولي $\left[Mg^{2+}\right] = \frac{3,42\times 10^{-3}}{0,2} = 1,71\times 10^{-2}\,mol.L^{-1}$

التمرين 20

ملاحظة : في البيـان المرفق مع التمرين ،لدينا على التراتيب $[I_2]$ (mmol/L) وليس mol/L .

1 - نبرّد الجزء الذي نريد معايرته من أجل إيقاف التفاعل فيه (أي إيقاف تكوّن ثنائي اليود) ، وذلك للتمكن من معايرة فقط الكمية التي تكون موجودة في لحظة التبريد .

2 – الثنائيتان هما : $S_2O_8^{2-} / SO_4^{2-}$ و I_2 / I^-

3 – النوع الكيميــائي المرجع هو شاردة اليود I^-

التعليل : رقم تأكسد عنصر اليود ارتفع من (1-) في I^- إلى (0) في I_2

4 – النوع الكيميــائي المؤكسد هو شاردة البيروكسوثنائي كبريتات $S_2O_8^{2-}$.

التعليل : رقم تأكسد عنصر الكبريت في $S_2O_8^{2-}$ هو x حيث : $2x - 16 = -2$ ، ومنه : $x = 7$

رقم تأكسد عنصر الكبريت في SO_4^{-2} هو x' حيث : $x' - 8 = -2$ ، ومنه : $x' = 6$ (رقم التأكسد انخفض)

5 – المعادلتان النصفيتان الإلكترونيتان هما : $S_2O_8^{2-} + 2\,e^- = 2\,SO_4^{2-}$ معادلة الإرجــاع

$2\,I^- = I_2 + 2\,e^-$ معادلة الأكسدة

6 – كميات المادة الابتدائية للمتفاعلات :

$$n\,(S_2O_8^{2-}) = n\,(K_2S_2O_8) = C_1\,V_1 = 1,5\times 10^{-2}\times 0,5 = 7,5\times 10^{-3}\ \text{mol}$$

$$n\,(I^-) = n\,(KI) = C_2\,V_2 = 0,5\,C_2$$

7 – جدول التقدم

معادلة التفاعل	$2\,I^-_{(aq)}$ +	$S_2O_8^{2-}{}_{(aq)}$ =	$I_{2(aq)}$ +	$2\,SO_4^{2-}{}_{(aq)}$	
حالة الجملة	التقدم	كمية المـــادة (mol)			
الابتدائية	0	$n\,(I^-)$	$n\,(S_2O_8^{2-})$	0	0
الانتقالية	x	$n\,(I^-) - 2\,x$	$n\,(S_2O_8^{2-}) - x$	x	$2\,x$
النهائية	x_{max}	$n\,(I^-) - 2\,x_{max}$	$n\,(S_2O_8^{2-}) - x_{max}$	x_{max}	$2\,x_{max}$

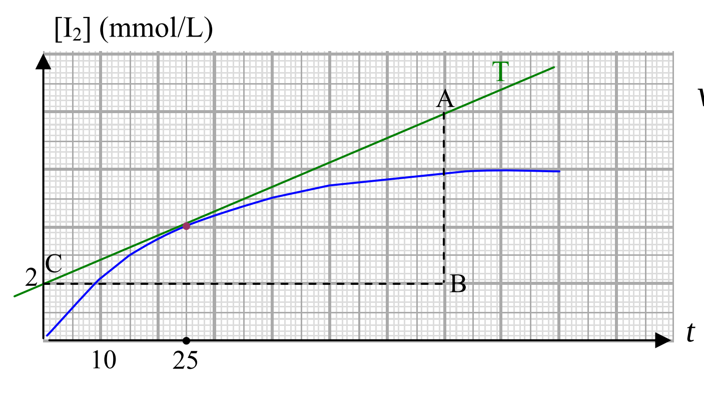
لكي نتأكد أن x يتغيّر بنفس الطريقة التي يتغيّر بها $[I_2]$ بدلالة الزمن ، نجد العلاقة بين x و $[I_2]$.

لدينا من جدول التقدم : $n(I_2) = x$ ، ومنه : $x = [I_2]\,V$ ، حيث V هو حجم المزيج وقيمته 1L ، وبالتالي $[I_2] = x$

إذن التقدم والتركيز المولي لثنائي اليود يتطوران بنفس الكيفية .

8 – نحسب ميل المماس T والذي يمثل السرعة الحجمية للتفاعل .

$$v = \frac{1}{V}\frac{dx}{dt} = \frac{d[I_2]}{dt} = \frac{2\times 3\times 10^{-3}}{7\times 10} = 8{,}5\times 10^{-5}\, mol.L^{-1}.mn^{-1}$$



9 – من البيان نستنتج التركيز المولي النهائي لثنائي اليود ، وهو $[I_2] = 6 \times 10^{-3}$ mol/L ،

ومنه كمية مـادة ثنائي اليود: $n(I_2) = [I_2]\,.\,V = 6 \times 10^{-3} \times 1 = 6 \times 10^{-3}$ mol

لو كان المتفاعل المحد هو $S_2O_8^{2-}$ لكنا وجدنا كمية مادة ثنائي اليود $7{,}5 \times 10^{-3}$ mol ، أي عدد مولات $S_2O_8^{2-}$ التي حسبناها سابقا .

إذن المتفاعل المحد هو شوارد اليــود .

ملاحظة : في مثل هذا التحول يجب أن تكون شوارد اليود دائما بزيادة ، والسبب مذكور في الدرس ، ومع ذلك نتابع حل التمرين .

10 – زمن نصف التفاعل هو الزمن الموافق لنصف قيمة التقدم النهائي .

من البيان التقدم الأعظمي $x_{max} = 6\times 10^{-3}\, mol$ ومنه $\frac{x_{max}}{2} = 3\times 10^{-3}\, mol$. الزمن الموافق على البيان هو $t_{1/2} = 15mn$

11 – بما أن المتفاعل المحد هو شاردة اليود فإن $n(I^-) - 2x_{max} = 0$ ، ومنه $n(I^-) = 2 \times 6 \times 10^{-3} = 1{,}2 \times 10^{-2}$ mol

ولدينا $n(I^-) = 0{,}5\, C_2$ ، ومنه : $C_2 = 2{,}4 \times 10^{-2}$ mol/L

التمرين 21

المركب العضوي 2- كلور – 2 – ميثيل بروبان هو

$$CH_3-\underset{CH_3}{\overset{Cl}{\overset{|}{\underset{|}{C}}}}-CH_3$$

. من أجل اختصار الكتابة نمثله بـ R – Cl ، حيث الجذر الألكيلي R هو $-C(CH_3)_3$

نكتب المعادلة إذن : $R-Cl_{(aq)} + H_2O_{(l)} = R-OH_{(aq)} + Cl^-_{(aq)} + H^+_{(aq)}$

1 – يمكن متابعة هذا التحول عن طريق قيـاس الناقلية لأن في المزيج المتفاعل توجد الشوارد ، وهي Cl^- و H^+ ، ونعلم أن الشوارد هي المسؤولة عن الناقلية الكهربائية للمحـاليل .

2 – التركيز الكتلي لـ R – Cl هو S = 4 g/L

التركيز المولي هو التركيز الكتلي مقسوم على الكتلة المولية الجزيئية ، أي $C = \frac{S}{M}$

كمية مادة R – Cl هي : $n(R-Cl) = [R-Cl]\,.\,V = \frac{S}{M}\,.\,V = 2 \times 10^{-3} \times \frac{4}{92{,}5} = 8{,}6 \times 10^{-5}$ mol

الماء موجود بزيـادة ، حيث لدينا الحجم المضاف هو $80\times\frac{95}{100} = 76\, mL$. ونعلم أن الكتلة الحجمية للماء هي 1 g/mL

إذن كتلة الماء المضافة هي 76 g ، وهذا يوافق $n(H_2O)=\frac{76}{18}=4{,}22\ mol$ ، وهي كمية كبيرة بالنسبة لكمية R – Cl

3 – جدول التقدم :

معادلة التفاعل		$R\text{-}Cl_{(aq)}$ +	$H_2O_{(l)}$ =	$R\text{-}OH_{(aq)}$ +	$H^+_{(aq)}$ +	$Cl^-_{(aq)}$
حالة الجملة الكيميائية	التقدم	كمية المـــادة بـ (mol)				
الحالة الابتدائية	0	$8{,}6\times10^{-5}$	زيادة	0	0	0
الحالة الانتقالية	$x(t)$	$8{,}6\times10^{-5} - x(t)$	زيادة	$x(t)$	$x(t)$	$x(t)$
الحالة النهائية	x_{max}	$8{,}6\times10^{-5} - x_{max}$	زيادة	x_{max}	x_{max}	x_{max}

4 - تُعطى الناقلية النوعية بالعلاقة $\sigma=\lambda_{Cl^-}[Cl^-]+\lambda_{H^+}[H^+]$ ، ولدينا : $[Cl^-]=\frac{n(Cl^-)}{V}$ و $[H^+]=\frac{n(H^+)}{V}$.

ومن جدول التقدم نستنتج $n(Cl^-)=n(H^+)=x(t)$ ، ومنه : $\sigma(t)=\frac{(\lambda_{Cl^-}+\lambda_{H^+})}{V}x(t)$ (1)

5 – تكون الناقلية النوعية معدومة في اللحظة $t=0$ ، لأن المزيج يكون خاليا من الشوارد (يتواجد نوعان كيميائيان جزيئيان هما R- Cl و H_2O ، مع الإشارة إلى أننا أهملنا شوارد $H^+_{(aq)}$ و $OH^-_{(aq)}$ في الماء لأن تركيزهما حوالي 10^{-7} mol/L)

6 – في نهاية التفاعل يكون $x=x_{max}$ ، وبالتالي تكون الناقلية النوعية : $\sigma_f=\frac{(\lambda_{Cl^-}+\lambda_{H^+})}{V}x_{max}$ (2)

7 – التقدم الأعظمي يساوي كمية مادة 2 – كلور-2- ميثيل بروبان ، أي $x_{max}=8{,}6\times10^{-5}\ mol$

8 – بتقسيم العلاقتين (1) و (2) طرفا لطرف نجد $\frac{\sigma_f}{\sigma(t)}=\frac{x_{max}}{x(t)}$ ، ومنه $x(t)=x_{max}\frac{\sigma(t)}{\sigma_f}$ (3)

9 - نستعمل العلاقة (3) لحساب التقدم في كل لحظة ، مع العلم أن $\sigma_f=298{,}1\ \mu S.cm^{-1}$ (من الجدول) .

من أجل كل لحظة نقسم $\sigma(t)$ على σ_f ونضرب الناتج في x_{max} ، مع ترك الناقليتين النوعيتين بنفس الوحدة .

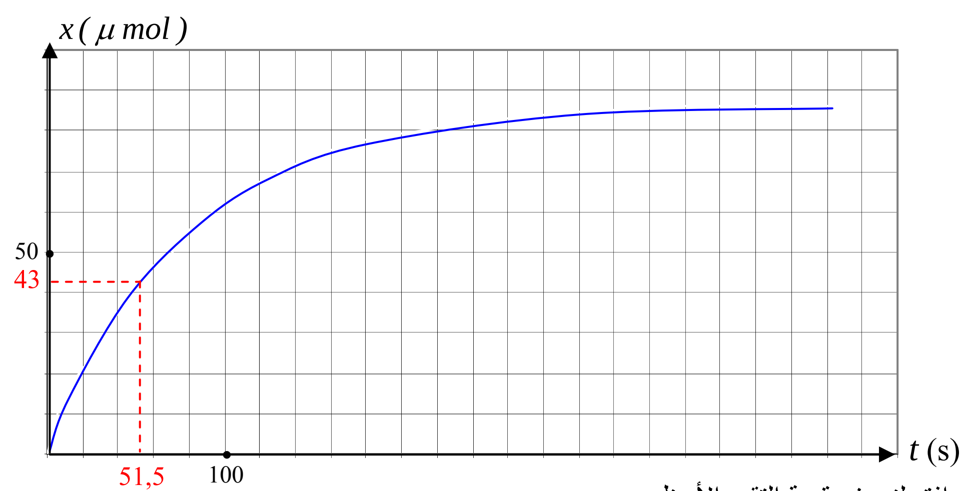
t (s)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$x(t)(\mu mol)$	0	15,2	21,5	28,6	34,9	41,2	46,6	49,3	55,5	59,1
t (s)	100	110	120	140	160	190	220	240	285	315
$x(t)(\mu mol)$	61,8	65,4	67,2	71,6	75,2	78,8	80,6	82,4	84,2	85,1
t (s)	365	375	380	450						
$x(t)(\mu mol)$	86,0	86,0	86,0	86,0						

10 - تمثيل التقدم بدلالة الزمن :

على محور التراتيب غيّرت السلم

بـ: 1 cm → 10 µ mol

للتذكير : (1µ mol = 10^{-6} mol)

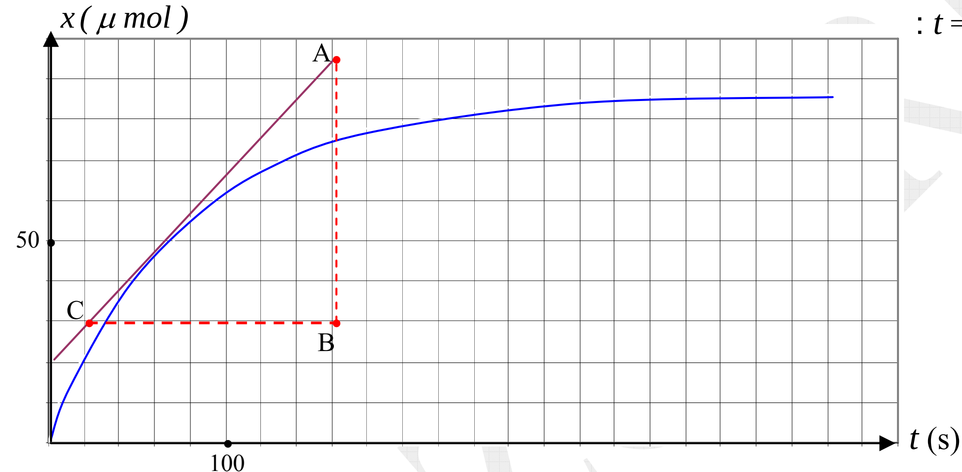


11 – زمن نصف التفاعل هو الزمن الموافق لنصف قيمة التقدم الأعظمي .

لدينا التقدم الأعظمي $x_{max} = 86\ \mu\ mol$ ، ومنه $\frac{x_{max}}{2} = 43\mu\ mol$. الزمن الموافق على البيان $t_{1/2} \approx 51{,}5$ s

– 12

السرعة الحجمية للتفاعل في اللحظة $t = 60$ s :

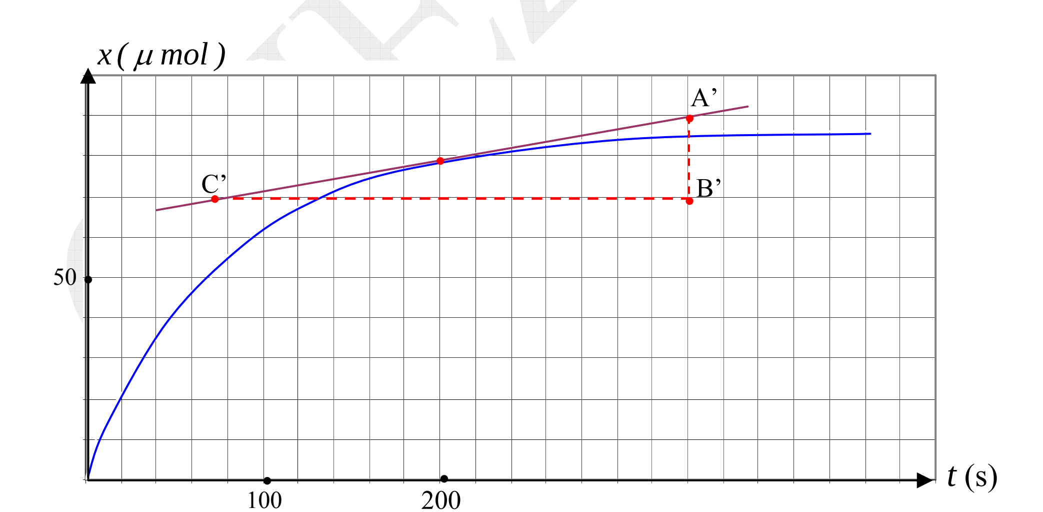


$$v = \frac{1}{V}\frac{dx}{dt} = \frac{1}{V}\frac{AB}{CB}$$

$$v = \frac{1}{82\times10^{-3}}\,\frac{66\times10^{-6}}{140}$$

$$v = 5{,}7\times10^{-6}\ mol.L^{-1}.s^{-1}$$

السرعة الحجمية للتفاعل في اللحظة $t' = 200$ s :



$$v' = \frac{1}{V}\frac{dx}{dt} = \frac{1}{V}\frac{A'B'}{C'B'}$$

$$v' = \frac{1}{82\times10^{-3}}\,\frac{20\times10^{-6}}{270}$$

$$v' = 9{,}0\times10^{-7}\ mol.L^{-1}.s^{-1}$$

13 - السرعة الحجمية للتفاعل في اللحظة $t = 200$ s أصغر من السرعة في اللحظة $t' = 60$ s . تناقص السرعة سببه تناقص تراكيز المتفاعلات خلال الزمن .

الذي يوضح ذلك بيانيا هو تناقص ميل المماس كلما زاد الزمن ، إلى أن يصبح هذا الميل معدوما عندما يصبح المماس أفقيا .

التمرين 22

معادلة التحوّل الكيميــائي : $3\ HNO_{2\ (aq)} \quad = \quad 2\ NO_{\ (g)} \ + \ H_3O^+_{\ (aq)} \ + \ NO_3^-{}_{\ (aq)}$

1 – جدول التقدم (أسفل الصفحة)

لدينا في اللحظة t كمية مادة حمض الأزوتيد هي : $n\left(HNO_2\right) = n_0\ (HNO_2) - 3x$ ، ومنه التركيز

المولي هو : $$\left[HNO_2\right] = \frac{n\left(HNO_2\right)}{V} = \frac{n_0(HNO_2)}{V} - \frac{3x}{V}$$

$$\left[HNO_2\right] = C_0 - \frac{3x}{V} \qquad (1)$$

أما كمية مادة شاردة النترات (NO_3^-) فهي : $n\,(NO_3^-) \ = x$ ، ومنه التركيز المولي لهذه الشاردة :

$$\left[NO_3^-\right] = \frac{x}{V} \qquad (2)$$

معادلة التفاعل		$3\ HNO_{2\ (aq)} \quad = \quad NO_{(g)} \ + \ H_3O^+_{\ (aq)} \ + \ NO_3^-{}_{(aq}$			
حالة الجملة	التقدم	كمية المـــادة بـ (mol)			
الحالة الابتدائية	0	$n_0\ (HNO_2)$	0	0	0
الحالة الانتقالية	x	$n_0\ (HNO_2) - 3\ x$	x	x	x
الحالة النهائية	x_{max}	$n_0\ (HNO_2)\ -\ 3\ x_{max}$	x_{max}	x_{max}	x_{max}

2 – السرعة الحجمية للتفاعل هي مفهوم له علاقة مباشرة مع الزمن ، وتتمثّل في مشتق التقدّم بالنسبة للزمن في وحدة الحجم .

أي : $$v = \frac{1}{V}\frac{dx}{dt}$$

• بالنسبة للمنحني $f\ (t)$ ، فهو يمثّل اختفاء حمض الأزوتيد HNO_2 خلال الزمن . نرمز لسرعة الاختفاء بـ v_d ، ونكتب :

$v_d = -\dfrac{d\left[HNO_2\right]}{dt}$ ، وباستعمال العلاقة (1) تصبح السرعة : $v_d = -\dfrac{dC_0}{dt} + \dfrac{3}{V}\dfrac{dx}{dt} = \dfrac{3}{V}\dfrac{dx}{dt}$ (مشتق عدد ثابت يساوي 0)

وبالتالي نكتب $v_d = 3v_x$ ، حيث v_x هي السرعة الحجمية للتفاعل ، ومنه $v_x = \dfrac{v_d}{3} \qquad (3)$

إذن يمكن معرفة السرعة الحجمية للتفاعل من البيان f (t) .

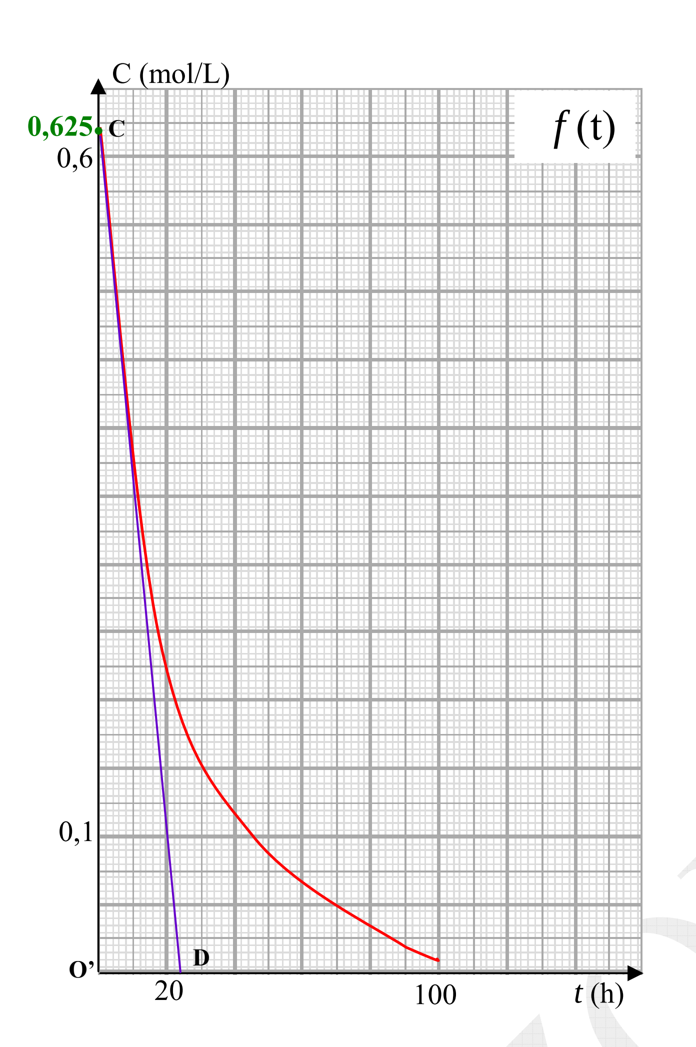
• بالنسبة للمنحني $g\ (t)$ ، فهو يمثل تشكل شاردة النترات خلال الزمن . نرمز لسرعة التشكل بـ v_a ، ونكتب :

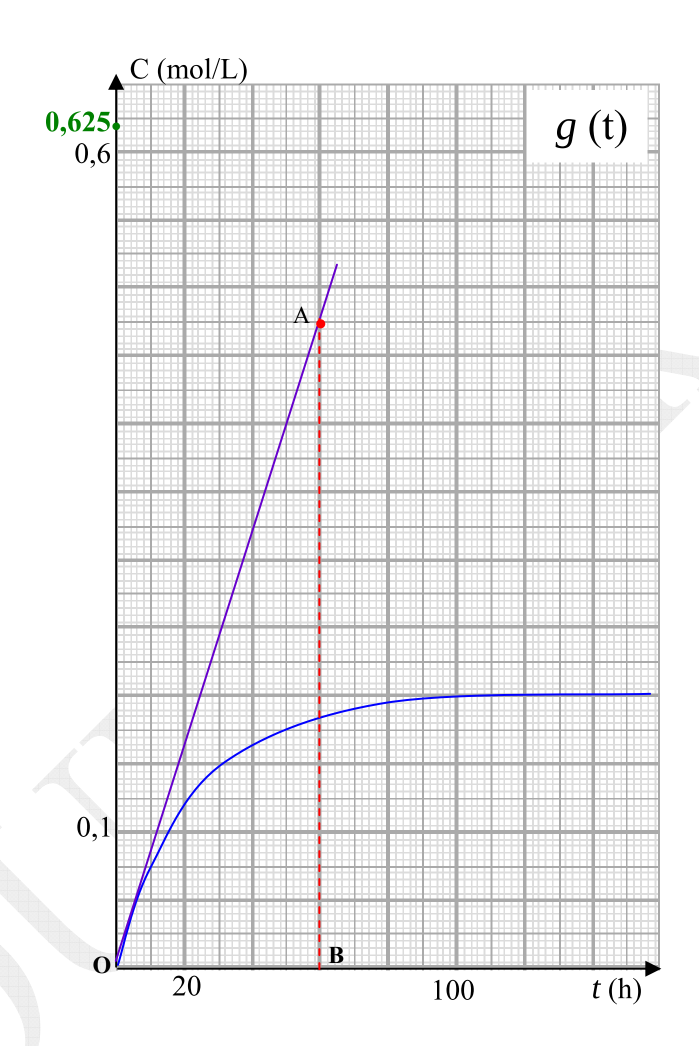
$v_a = \dfrac{d\left[NO_3^-\right]}{dt}$ ، وباستعمال العلاقة (2) تصبح السرعة : $v_a = \dfrac{1}{V}\dfrac{dx}{dt}$

وبالتالي نكتب $v_x = v_a \qquad (4)$

إذن يمكن معرفة السرعة الحجمية للتفاعل من البيان g (t) .

3 - السرعة الحجمية الإبتدائية للتفاعل (v_0) : نحسبها بيانيا في اللحظة $t = 0$ إما من البيان $f(t)$ أو $g(t)$





من البيان g (t) :

سرعة ظهور شاردة النترات هي :

$$v_a = \frac{d\left[NO_3^-\right]}{dt} = \frac{AB}{OB} = \frac{9,6 \times 0,05}{60} = 8,0 \times 10^{-3}\, mol.L^{-1}.h^{-1}$$

باستعمال العلاقة (4) نجد السرعة الحجمية للتفاعل $v_0 = v_x = 8,0 \times 10^{-3}\, mol.L^{-1}.h^{-1}$

من البيان *f* (t) :

سرعة اختفاء حمض الأزوتيد هي :

$$v_a = -\frac{d\left[HNO_2\right]}{dt} = -(-\frac{O'C}{O'D}) = +\frac{0,625}{25} = 2,5 \times 10^{-2}\, mol.L^{-1}.h^{-1}$$

باستعمال العلاقة (3) نجد السرعة الحجمية للتفاعل $v_0 = v_x = \frac{2,5 \times 10^{-2}}{3} = 8,3 \times 10^{-3}\, mol.L^{-1}.h^{-1}$

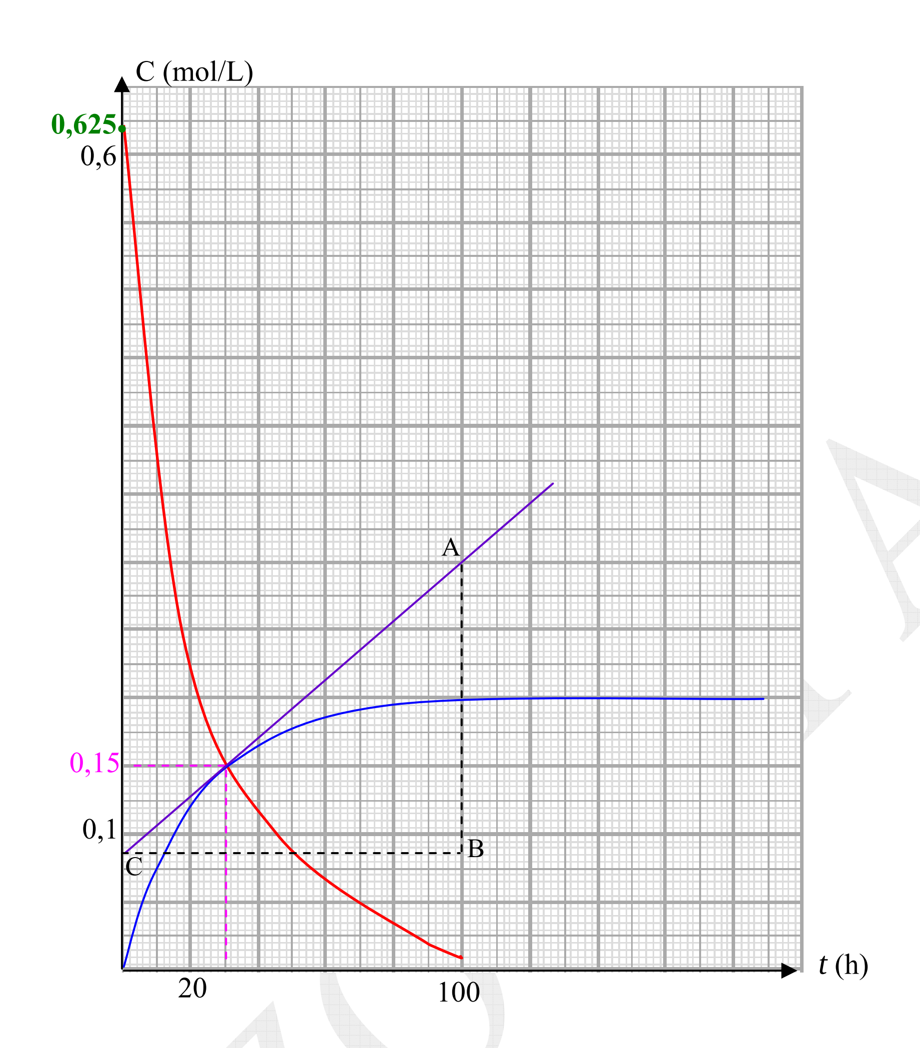
السرعتان متساويتان في حدود أخطاء التمثيل البياني .

4 - نقطة تقاطع البيانين توافق : $[HNO_2] = [NO_3^-] = 0,15\ mol.L^{-1}$

ومن معادلة التحول نستنتج : $[H_3O^+] = 0,15\ mol.L^{-1}$ و $[NO] = 2 \times 0,15 = 0,3\ mol.L^{-1}$

حجم المزيج غير معروف .

السرعة الحجمية للتفاعل عند اللحظة t_1 : $v'_x = v'_a = \frac{AB}{CB} = \frac{4,3 \times 0,05}{100} = 2,1 \times 10^{-3} \, mol.L^{-1}.h^{-1}$



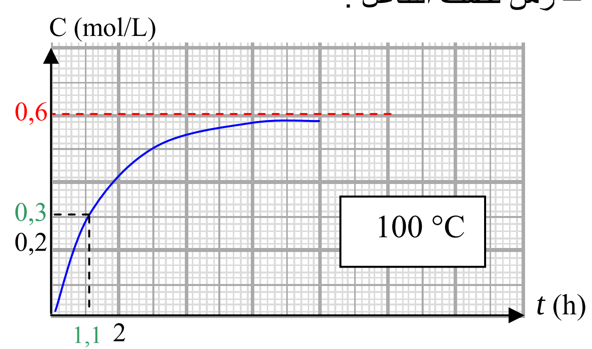
5 - السرعة تتناقص ، والعامل الحركي هو التركيز المولي لحمض الأزوتيد .

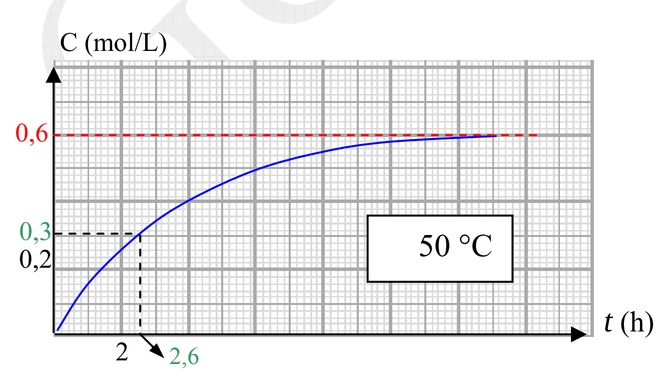
6 – نعتبر التحول قد انتهى في اللحظة $t = 100$ h ، وعندها تنعدم السرعة الحجمية للتفاعل .

التمرين 23

معادلة التحول : A + B = C + D

1 – زمن نصف التفاعل :





C : معناه التركيز المولي للفرد الكيميائي C الذي ينتج في التحوّل الكيميائي .

$$\begin{array}{ccccccc} A & + & B & = & C & + & D \\ n_A & & & & 0 & & \\ n_A - x & & & & x & & \end{array}$$

لدينا في اللحظة t : $x = [C].V$ ، فمن أجل قيمتين لـ x ، x_1 و x_2 نكتب : $x_1 = [C_1]V$ ، $x_2 = [C_2]V$

فإذا كان $x_2 = \frac{x_1}{2}$ ، فإن كذلك بتقسيم العلاقتين طرفا لطرف يكون $[C_2] = \frac{[C_1]}{2}$.

إذن لكي نحسب زمن نصف التفاعل يكفي أن نقسم التركيز الأعظمي للنوع الكيميائي C على 2 ونستنتج $t_{1/2}$ من بيان التركيز .

2 – كلما كان زمن نصف التفاعل أقل تكون سرعة التفاعل عند $t = 0$ أكبر ، أي أن كلما كانت درجة حرارة المزيج أكبر كلما كان التحول أسرع . (درجة الحرارة عامل حركي)

التمرين 24

1 - أ) سبب تحول اللون البنفسجي لعديم اللون هو تفاعل شاردة البرمنغنات وتحولها لشاردة المنغنيز Mn^{2+} عديمة اللون . **أما سبب زوال اللون** ، فيجب أن نبيّن أن شاردة البرمنغنات هي المتفاعل المحدّ .

كمية مادة البرمنغنات :

$n(MnO_4^-) = [MnO_4^-]\, V_1 = 0{,}2 \times 0{,}2 \times 10^{-3} = 4{,}0 \times 10^{-5}$ mol ، حيث V_1 هو حجم برمنغنات البوتاسيوم .

$1\ cm^3 = 1 mL = 10^{-3}$ L

كمية مادة حمض الأكساليك :

$n(H_2C_2O_4) = [H_2C_2O_4]\, V_2 = 0{,}2 \times 0{,}005 = 1{,}0 \times 10^{-3}$ mol ، حيث V_2 هو حجم حمض الأوكساليك .

معادلة التحوّل الكيميائي هي :

$$2\, MnO_4^-{}_{(aq)} + 6\, H^+{}_{(aq)} + 5\, H_2C_2O_4{}_{(aq)} = 2\, Mn^{2+}{}_{(aq)} + 10\, CO_{2\,(g)} + 8\, H_2O_{(l)}$$

المتفاعلان	$2\, MnO_4^-{}_{(aq)}$ +	$5\, H_2C_2O_4{}_{(aq)}$
$t = 0$	$4{,}0 \times 10^{-5}$	10^{-3}
t	$4\times10^{-5} - 2x$	$10^{-3} - 5x$

$$4\times10^{-5} - 2x = 0 \Rightarrow x = 2\times10^{-5}\, mol$$

$$10^{-3} - 5x = 0 \Rightarrow x = 2\times10^{-4}\, mol$$

إذن المتفاعل المحد هو برمنغنات البوتاسيوم (أصغر قيمة للتقدم)

ونستنتج من هذا أن الكمية المضافة (0,2 mL) تختفي كلها عند إضافتها .

ب) السرعة الحجمية الوسطية (المتوسطة) المقصودة هي : $v = \frac{1}{V}\frac{\Delta x}{\Delta t}$ (1)

لدينا $n\ (MnO_4^-) = 4\times10^{-5} - 2x = 0$ ، يمكن أن نكتب $\frac{\Delta n(MnO_4^-)}{\Delta t} = 0 - 2\frac{\Delta x}{\Delta t}$ ، وبالتالي

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = -\frac{1}{2}\frac{\Delta n(MnO_4^-)}{\Delta t} \quad (2)$$

بتقسيم طرفي المعادلة (2) على V (حجم المزيج) نكتب : $\frac{1}{V}\times\frac{\Delta x}{\Delta t} = -\frac{1}{2V}\frac{\Delta n(MnO_4^-)}{\Delta t}$ ، ومنه السرعة الحجمية المتوسطة

(أهملنا 2 mL أمام 200 mL) $v=-\frac{1}{2\times 0,2}\left(\frac{0-4\times10^{-5}}{45-0}\right)=2,2\times10^{-6}mol.L^{-1}s^{-1}$

2 – بعد زوال اللون البنفسجي وجدنا $x=2\times10^{-5}mol$ وهي نفسها التقدم الأعظمي ، حينئذ تكون كمية مادة حمض الأكساليك الباقية في المزيج : $n(H_2C_2O_4)=10^{-3}-5x=10^{-3}-5\times2\times10^{-5}=9,0\times10^{-4}mol$ ، أما التركيز المولي للحمض هو :

$$[H_2C_2O_4]=\frac{9\times10^{-4}}{0,2}=4,5\times10^{-3}mol/L$$

3 - أ) $v'=-\frac{1}{2\times 0,2}\left(\frac{0-4\times10^{-5}}{28-0}\right)=3,57\times10^{-6}mol.L^{-1}s^{-1}$

وجدنا السرعة الثانية أكبر من الأولى .

في التجربة الأولى نلاحظ أن الكمية 0,2 mL من البرمنغنات نفذت في المدة 45 s ، أما في التجربة الثانية نلاحظ أن نفس الكمية نفذت في مدة أقل (28 s) . وكأننا أضفنا 0,4 mL من البرمنغنات جملة واحدة والسرعة شرعت في التزايد ، وهذا غير منطقي في تفاعل عادي ، لأن تناقص التركيز يؤدّي إلى تناقص السرعة ، لكن في هذا التحول حدث ما يلي : في التجربة الثانية (الإضافة الثانية) كانت هناك كمية من شوارد المنغنيز Mn^{2+} الناتجة عن الإضافة الأولى ، وهذه الشوارد كانت سببا في تحفيز التفاعل (التحفيز الذاتي في هذه الحالة) . وهذا ما جعل السرعة في التجربة الثانية أكبر من السرعة في التجربة الأولى .

4 – في هذه الحالة (أي التجربة الثانية) يتدخّل عاملان حركيان هما التحفيز ودرجة الحرارة ، لهذا تكون السرعة أكبر ولا يدوم التحول إلا ثانية واحدة .

التمرين 25

معادلة التحلل : $2\,H_2O_{2\,(l)} = 2\,H_2O_{\,(l)} + O_{2\,(g)}$

1 – دون الوسيط يكون التفاعل بطيئا ، وخاصة في درجة حرارة منخفضة .

2 – في هذا التحوّل لدينا وساطة متجانسة ، أي أن الوسيط والمتفاعلات من نفس الحالة الفيزيائية (سوائل) .

للعلم فقط أن في حالة الوساطة المتجانسة يظهر الناتج في جميع أنحاء البيشر ، أما في الوساطة غير المتجانسة يظهر الناتج بجوار الوسيط .

يمكن تحفيز هذا التفاعل بواسطة سلك من البلاتين (وساطة غير متجانسة) بحيث نلاحظ انطلاق غاز الأكسجين بجوار السلك فقط .


المرحلة 3


المرحلة 4

3 – الشيء الذي يوضّح أن الوسيط قد شارك في التفاعل هو صورة المرحلة (3) - اللون البنّي والفوران

الفوران : انطلاق ثنـائي الأكسجين

اللون البني: ناتج عن المركبات المعقدة التي يمر بها الوسيط وهو يسرّع في التفاعل ، حيث أنه يغيّر آلية (ميكانيزم) التفاعل .

4 – المعلومة المتعلّقة بالوسيط التي تبرزها الصورة نرصدها في صورة المرحلة 4 ، بحيث أن هذا اللون الأصفر الصدئي هو لون شوارد الحديد الثلاثية . يدلّ هذا على أن الوسيط أنهى مهمته وعاد إلى لونه الطبيعي (الأصلي) .

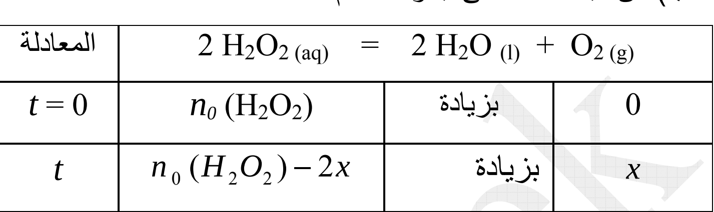
التمرين 26

معادلة التحوّل الكيميــائي : $2\,H_2O_{2\,(aq)} \;=\; 2\,H_2O_{(l)} + O_{2\,(g)}$

1 - أ) من البيان نستنتج كمية مادة الماء الأكسوجيني الموافقة

لـ $t = 10$ mn ، $n\,(H_2O_2) = 4{,}5$ mol

ب) من أجل ذلك ننشئ جدول التقدم



المعادلة	$2\,H_2O_{2\,(aq)} \;=$	$2\,H_2O_{(l)}$ +	$O_{2\,(g)}$
$t = 0$	$n_0\,(H_2O_2)$	بزيادة	0
t	$n_0\,(H_2O_2) - 2x$	بزيادة	x

في اللحظة $t\;=10$ mn تكون كمية مـادة الماء الأكسوجيني:

$$n\left(H_2O_2\right) = 7{,}8 - 2x\;= 4{,}5$$

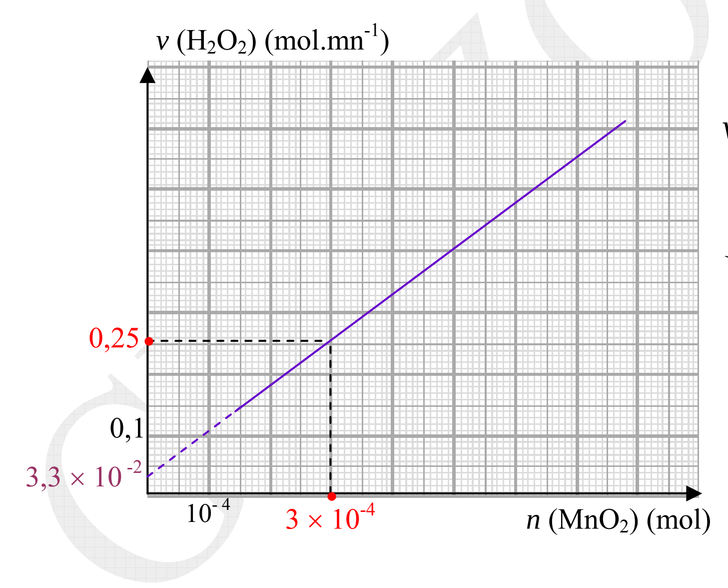
وبالتالي $x = 1{,}65\ mol$ ، ومنه كمية مادة ثنائي الأكسوجين هي : $n\,(O_2) = 1{,}65$ mol . الماء موجود بكثرة لأن الماء الأكسوجيني في هذه الحالة عبارة عن محلول مائي ($H_2O_{2\,(aq)}$) أي الماء موجود قبل التفاعل . ومنه التركيب المولي للمزيج : $n\,(H_2O_2) = 4{,}5$ mol ، $n\,(O_2) = 1{,}65$ mol

جـ) سرعة اختفاء المــاء الأكسوجيني :

$$v = -\frac{d\,n\,(H_2O_2)}{dt} = -(-\frac{AB}{BC}) = \frac{6{,}3}{25} = 2{,}5\times10^{-1}\,mol.mn^{-1}$$

2 - أ) نقطة تقاطع بيـان سرعة اختفـاء الماء الأكسوجيني مع محور التراتيب هي السرعة في غيـاب الوسيط .

$$v = 3{,}3\times10^{-2}\,mol.mn^{-1}$$



ب) لإيجاد كمية مادة الوسيط المستعملة في السؤال 1- ،

نستعمل بيان السرعة ونأخذ القيمة الموافقة لـ $v = 0{,}25$ mol.mn^{-1}

وهي : $n\,(MnO_2) = 3\times10^{-4}$ mol

جـ) كلما استعملنا كمية أكبر من الوسيط نحصل على سرعة أكبر

عند اللحظة $t = 0$.

التمرين 27

معــادلة التحوّل : $S_2O_8^{2-}{}_{(aq)} + 2\,I^-{}_{(aq)} \;=\; 2\,SO_4^{2-} + I_{2\,(aq)}$

1 - السرعة الحجمية للتفاعل هي مفهوم له علاقة مباشرة مع الزمن ، وتتمثّل في مشتق التقدّم بالنسبة للزمن في وحدة الحجم .

أي : $v = \dfrac{1}{V}\dfrac{dx}{dt}$ ، ولكي نعبّر عنها بدلالة $\left[S_2O_8^{2-}\right]$ ننشئ جزءا من جدول التقدّم :

معادلة التفاعل	$S_2O_8^{2-}{}_{(aq)} + 2\,I^-{}_{(aq)} = 2\,SO_4^{2-} + I_{2\,(aq)}$	
t = 0	$n_0\,(S_2O_8^{2-})$	
t	$n_0\,(S_2O_8^{2-}) - x$	

لدينا كمية مادة $S_2O_8^{2-}$ في اللحظة t هي : $n\left(S_2O_8^{2-}\right) = n_0\,(S_2O_8^{2-}) - x$ ، ومنه : $\left[S_2O_8^{2-}\right] = \dfrac{n_0\,(S_2O_8^{2-}) - x}{V}$

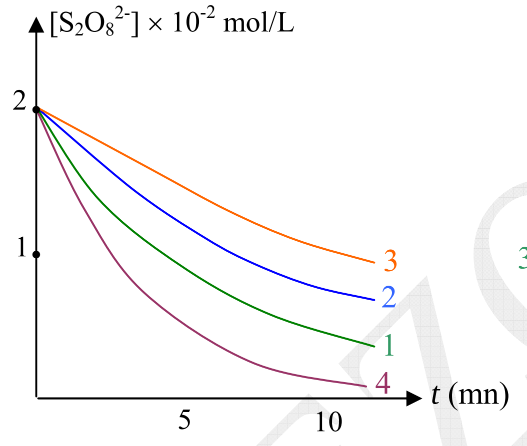
باشتقاق طرفي هذه المعادلة بالنسبة للزمن : $\dfrac{d\left[S_2O_8^{2-}\right]}{dt} = \dfrac{1}{V}\left(\dfrac{d\,n_0(S_2O_8^{2-})}{dt} - \dfrac{dx}{dt}\right) = -\dfrac{1}{V}\dfrac{dx}{dt}$

(مشتق عدد ثابت = 0)

وبالتالي سرعة التفاعل بدلالة تركيز شاردة البروكسوثنائي كبريتات هي : $v = -\dfrac{d\left[S_2O_8^{2-}\right]}{dt}$

2 - **ملاحظة خاصة بالمعطيات** : في التجارب الأربعة استعملنا الوسيط فقط في التجربة الرابعة ، إجلاء للغموض في نص التمرين الذي يوحي أن كل التجارب أستُعمل فيها الوسيط ، مع الإشــارة إلى أن شوارد الحديد الثنائية كافية لتحفيز هذا التفاعل .

المقصود في السؤال تعيين التركيز المولي عند اللحظة $t = 0$ لشوارد $S_2O_8^{2-}$ ،
وهذا التركيز هو الموجود على البيان $[S_2O_8^{2-}] = 2 \times 10^{-2}$ mol/L .



3-

سرعة اختفاء شوارد $S_2O_8^{2-}$ تتزايد عند $t = 0$ من التجربة **3** إلى **2** إلى **1**
لأن درجة الحرارة في هذه التجارب تتزايد من 15°C إلى 23°C إلى 32°C
التجربة 4 أجريت في نفس درجة حرارة التجربة 1 ، لكن بوجود وسيط ، إذن في هذه التجربة تكون أكبر سرعة لإختفاء شوارد $S_2O_8^{2-}$.

4 - العوامل الحركية التي تبرزها هذه التجارب هي :

التجربة **1** : درجة الحرارة

التجربة **2** : درجة الحرارة

التجربة **3** : درجة الحرارة

التجربة **4** : درجة الحرارة + الوسيط (شوارد Fe^{2+}) .

5 – نلاحظ على البيان أن كمية المادة المختفية من شوارد $S_2O_8^{2-}$ تكون معتبرة في مدة قصيرة إذا ما قورنت بالمدة اللازمة لإجراء المعايرة ، لهذا يجب إيقاف التفاعل للتمكن من المعايرة ، وذلك بوضع العيّنة المعايَرة في ماء الثلج .

(لهذا يجب أن نعرّف السرعة والبطء في التفاعلات بنسْبها إلى المدة المستغرقة في تقنية المتابعة)

التمرين 28

ملاحظة : هذا التمرين موجود على الطبعة الأولى للكتاب المدرسي ، وقد أستبدل بتمرين آخر حلّه موجود على الملحق

معادلة التحوّل الكيميــائي: $H_2O_{2\,(l)} + 2\,H^+{}_{(aq)} + 2\,I^-{}_{(aq)} = 2\,H_2O_{(l)} + I_{2\,(aq)}$

1 – أ)

	محلول H_2SO_4 1 mol.L⁻¹	محلول KI 0,1 mol.L⁻¹ الحجم V_2	H_2O_2 0,1 mol.L⁻¹ الحجم V_1	H_2O
الخليط *a* 30 mL	10 mL	18 mL	2 mL	0
الخليط *b* 40 mL	10 mL	10 mL	10 mL	10 mL
الخليط *c* 30 mL	10 mL	10 mL	1 mL	9 mL

المقصود بالتركيز المولي الابتدائي هو التركيز المولي في المزيج في اللحظة $t = 0$. من أجل حسابه ، نحسب أولا عدد المولات في كل محلول ثم نقسم على حجم المزيج (الخليط) .

الخليط (a) :

التركيز المولي $[H_2O_2]_0$: لدينا : $n(H_2O_2) = [H_2O_2] \times V_1 = 0,1 \times 2 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-4}$ mol ، أما التركيز المولي

الإبتدائي فهو : $[H_2O_2]_0 = \dfrac{n(H_2O_2)}{\Sigma V} = \dfrac{2\times10^{-4}}{30\times10^{-3}} = 6,7\times10^{-3}\, mol.L^{-1}$

التركيز المولي $[I^-]_0 = [KI]_0$: لدينا : $n(I^-) = [I^-] \times V_2 = 0,1 \times 18 \times 10^{-3} = 1,8 \times 10^{-3}$ mol ، أما التركيز المولي

الإبتدائي فهو : $[I^-]_0 = \dfrac{n(I^-)}{\Sigma V} = \dfrac{1,8\times10^{-3}}{30\times10^{-3}} = 6,0\times10^{-2}\, mol.L^{-1}$

الخليط (b) :

التركيز المولي $[H_2O_2]_0$: لدينا : $n(H_2O_2) = [H_2O_2] \times V_1 = 0,1 \times 10 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3}$ mol ، أما التركيز المولي

الإبتدائي فهو : $[H_2O_2]_0 = \dfrac{n(H_2O_2)}{\Sigma V} = \dfrac{10^{-3}}{40\times10^{-3}} = 2,5\times10^{-2}\, mol.L^{-1}$

التركيز المولي $[I^-]_0$: لدينا : $n(I^-) = [I^-] \times V_2 = 0,1 \times 10 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3}$ mol ، أما التركيز المولي الإبتدائي

فهو : $[I^-]_0 = \dfrac{n(I^-)}{\Sigma V} = \dfrac{10^{-3}}{40\times10^{-3}} = 2,5\times10^{-2}\, mol.L^{-1}$

الخليط (c) :

التركيز المولي $[H_2O_2]_0$: لدينا : $n(H_2O_2) = [H_2O_2] \times V_1 = 0,1 \times 1 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-4}$ mol ، أما التركيز المولي

الإبتدائي فهو : $[H_2O_2]_0 = \dfrac{n(H_2O_2)}{\Sigma V} = \dfrac{10^{-4}}{30\times10^{-3}} = 3,3\times10^{-3}\, mol.L^{-1}$

التركيز المولي $[I^-]_0$: لدينا : $n(I^-) = [I^-] \times V_2 = 0,1 \times 10 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3}$ mol ، أما التركيز المولي الابتدائي

فهو $[I^-]_0 = \dfrac{n(I^-)}{\Sigma V} = \dfrac{10^{-3}}{30\times10^{-3}} = 3,3\times10^{-2}\, mol.L^{-1}$

ب) المتفاعل المحدّ في كل خليط :

	$H_2O_{2\,(l)}$ +	$2\,H^+_{(aq)}$ +	$2\,I^-_{(aq)}$ =	$2\,H_2O_{(l)}$ +	$I_{2\,(aq)}$
$t=0$	$n\,(H_2O_2)$	$n\,(H^+)$	$n\,(I^-)$		0
t	$n\,(H_2O_2)-x$	$n\,(H^+)-2x$	$n\,(I^-)-2x$		x

كمية مادة كل متفاعل في كل خليط :

$n\,(H^+) = 2\,n\,(H_2SO_4) = 2 \times 1 \times 10 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-2}$ mol

$n\,(I^-)$ (mol)	$n\,(H^+)$ (mol)	$n\,(H_2O_2)$ (mol)	الخليط
18×10^{-4}	2×10^{-2}	2×10^{-4}	a
10^{-3}	2×10^{-2}	10^{-3}	b
10^{-3}	2×10^{-2}	10^{-4}	c

لكي نعيّن المتفاعل المحد في كل خليط ، نعدم كمية مادة كل متفاعل في اللحظة t ، وتكون أصغر قيمة لـ x موافقة للمتفاعل المحدّ .

الخليط a :

$$\begin{cases} 2\times10^{-4}-x=0 \Rightarrow x=2,0\times10^{-4}\,mol \\ 18\times10^{-4}-2x=0 \Rightarrow x=9,0\times10^{-4}\,mol \\ 2\times10^{-2}-2x=0 \Rightarrow x=1,0\times10^{-2}\,mol \end{cases}$$

⇐ المتفاعل المحدّ هو H_2O_2

الخليط b :

$$\begin{cases} 10^{-3}-x=0 \Rightarrow x=10^{-3}\,mol \\ 10^{-3}-2x=0 \Rightarrow x=5,0\times10^{-4}\,mol \\ 2\times10^{-2}-2x=0 \Rightarrow x=10^{-2}\,mol \end{cases}$$

⇐ المتفاعل المحدّ هو I^-

الخليط c :

$$\begin{cases} 10^{-4}-x=0 \Rightarrow x=10^{-4}\,mol \\ 10^{-3}-2x=0 \Rightarrow x=5,0\times10^{-4}\,mol \\ 2\times10^{-2}-2x=0 \Rightarrow x=10^{-2}\,mol \end{cases}$$

⇐ المتفاعل المحدّ هو H_2O_2

2 – التركيز المولي النهائي لثنائي اليود في كل خليط : نعلم أن $n\,(I_2)=x$. إذن من أجل كل خليط نقسم قيمة x على حجم المزيج .

الخليط a : $[I_2]_f = \dfrac{2\times10^{-4}}{30\times10^{-3}} = 6,7\times10^{-3}\,mol.L^{-1}$ ، أو من البيان

الخليط b : $[I_2]_f = \dfrac{5\times10^{-4}}{40\times10^{-3}} = 12,5\times10^{-3}\,mol.L^{-1}$ ، البيان لا يوافق

الخليط c : $[I_2]_f = \dfrac{10^{-4}}{30\times10^{-3}} = 3,3\times10^{-3}\,mol.L^{-1}$ ، أو من البيـان

3 – نفس القيم نجدها عند اللحظة t = 30 mn ، لأن سرعة تشكل ثنائي اليود تكون معدومة عند هذه اللحظة (المماس أفقي) .